

# 航空写真を用いた東日本大震災の浦安市における液状化被害分析

## Analysis of Liquefaction Damage in Urayasu City in the 2011 Tohoku, Japan Earthquake Using Aerial Photographs

戸井田 亮祐<sup>1</sup>, 山崎 文雄<sup>2</sup>

Ryosuke TOIDA<sup>1</sup> and Fumio YAMAZAKI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻

Department of Socio-Cultural Environmental Studies, the University of Tokyo

<sup>2</sup>千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻

Department of Urban Environment Systems, Chiba University

In the 11 March 2011 Tohoku, Japan earthquake, widespread liquefaction occurred in Urayasu city, Chiba prefecture, and it caused serious damage to wood-frame houses, underground pipelines and other structures. In this kind of situation, it is effective to estimate damage distribution quickly for emergency response purposes. But early damage estimation of structures due to liquefaction is very difficult because these damages do not appear clearly on the ground surface. On the other hand, it is comparatively easy to access the degree of liquefaction using sand boils and ground subsidence, which can be observed from the ground or air. Thus in this study, the relationships between these visible effects due to liquefaction and various damage are investigated using aerial photographs.

**Keywords:** the 2011 Tohoku Earthquake, Urayasu, liquefaction, damage estimation, aerial photograph

### 1. はじめに

2011年3月11日、日本の観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) が発生し、死者・行方不明者は約1万9千人、住宅被害は全壊約13万棟、半壊約25万棟と、大きな人的・物的被害を引き起こした<sup>1)</sup>。震源から遠く離れた千葉県浦安市においても、既に多数報告されているように<sup>2), 3)</sup>、上下水道や都市ガスなどの地中埋設管が損傷し応急復旧が完了するまでに最大で1ヵ月以上を要した<sup>4)</sup>ほか、戸建住宅の傾斜や道路の損壊も多数みられた。これらの被害により、住民は長期間の不自由な生活を強いられた。

緊急対応や応急復旧計画立案のためには、地震発生の初期段階で、たとえ大まかであっても、これらの被害状況の把握が必要である。地表モニタリングの1つとして航空機からのリモートセンシングがあり、人工衛星からのものと比べると災害発生直後に、また局所的な観測が可能である。とくにデジタル航空カメラを用いた航空写真は、高空間分解能で明瞭な画像を得られるという利点がある。このような航空写真から地震被害分布を把握できれば、緊急対応や復旧・復興計画立案に有効な情報となりうる。

航空リモートセンシングは、我が国の災害対応においてこれまでも頻りに利用されており、本地震においては、津波被害を受けた被災地を中心として航空写真の撮影が行われ、津波被災マップの作成などに役立てられた<sup>5)</sup>。

浦安市では、朝倉ら<sup>6)</sup>により航空レーザ測量が行われ、地震前後における地盤標高の変化が計測された。しかし、液状化による地中埋設管などの被害は、地表にはっきりと現れることが少なく、航空リモートセンシングによる計測が困難である。既往の研究によれば、液状化による地盤水平変位と埋設管などの被害の間には相関があることが認められており<sup>7), 8)</sup>、鉛直変位とも相関があると推測できる。したがって、地表から観測可能な噴砂などの液状化に起因する現象や地盤鉛直変位から、埋設管路や戸建て住宅の被害をある程度推定することが可能と考えられる。

そこで本研究では、これらの被害を推定することを目的として、航空写真を用いて把握可能な地表に現れた液状化現象 (液状化データ) と液状化が埋設管や住宅などに与えた直接的な被害 (被害データ) の関係について分析を行い、これらの被害の推定手法について検討する。この被害分析は、東北地方太平洋沖地震で大規模な液状化が発生した浦安市の埋立地を対象として、町丁目単位で液状化データと被害データの相関について調べる。

### 2. 使用データ

浦安市は千葉県の北西部に位置しており、二度の埋立事業を経て、市の面積は埋立て前の約4倍の16.98km<sup>2</sup>となった<sup>9)</sup>。浦安市の町丁目と埋立て年代による区分を図

1に示す。北から以前からの陸地、第一期埋立事業によりできた区域、第二期埋立事業による区域と並んでおり、それぞれ「元町」、「中町」、「新町」と呼ばれる。さらに細かく町丁目を分けると、海楽、美浜、入船、東野、富岡、今川、弁天、鉄鋼通り、舞浜が第一期埋立事業によりできた「中町」、日の出、明海、高洲、港、千鳥が第二期埋立事業によりできた「新町」に区分することができる。なお、浦安市の埋め立て地には、戸建て住宅、団地などの集合住宅、高層ビル、工場、アミューズメント施設と様々な種類の建築物が建っているが、土地利用が町丁目によって比較的明瞭に分かれているのが特徴である。また、地盤改良も町丁目毎に行われている可能性が高く、町丁目単位での液状化現象とそれによる被害の比較は有意であると考えられる。

本研究で使用したデータは、前述の液状化データ（地表に現れた液状化現象）として「液状化面積率」と「平均地盤相対沈下量」、被害データ（埋設管や戸建て住宅の被害）として「下水道管路被害率」と「戸建て住宅傾斜被害率」を使用して、分析を行った。それぞれのパラメータについては次式のように定義した。

$$\text{液状化面積率} = \frac{\text{液状化面積}}{\text{建物を除いた全体の面積}} \quad [1]$$

$$\text{平均地盤相対沈下量} = \frac{\text{沈下量の合計値}}{\text{沈下量測定点数}} \quad [2]$$

$$\text{下水道管路被害率} = \frac{\text{被害管路延長}}{\text{下水道管路延長}} \quad [3]$$

$$\text{戸建て住宅傾斜被害率} = \frac{\text{半壊以上の建物数}}{\text{全建物数}} \quad [4]$$

液状化面積や下水道管路延長を町丁目で集計するにあたり、ポリゴン・ラインを町丁目の境界で分断する処理をArcGISにより行っている。そのため、町丁目の境界に存在するポリゴン・ラインであっても、必ずいずれかの町丁目に属するようになっている。したがって、これら線的な評価を町丁目といった面的な評価と直接比較することには、誤差が含まれることに留意しなければならない。

### (1) 液状化面積率

液状化面積率とは、町丁目ごとの液状化面積を建物接地面積を除いたその全体面積で除したものである。全体面積からの建物接地面積の除去は、この部分には液状化による噴砂が現れないことを考慮して行った。建物接地面積を除く際に使用した建物輪郭データは、浦安市下水道課から提供を受けたものである。ここで調べたのはあくまで液状化により地表に現れた噴砂である。そのため、必ずしも液状化地点とは一致しないことに留意する必要がある。液状化面積の算出は、航空写真から液状化により噴出した砂を目視判読することで行った。この空中写真は千葉県が独自に撮影したもので、空撮は本震から6日後の2011年3月17日午前に行われ、地上解像度は25cmと非常に高解像度のものである。撮影時の気象条件は晴れで、雲などは映っていない。しかし、残念ながら地震直後のものでないために、液状化による噴砂などがかなり片づけられている。

第1著者が目視判読により作成した液状化マップを図2に示す。これを概観すると、非埋立地である元町では液状化の発生がほとんどなく、埋立地と非埋立地の境界

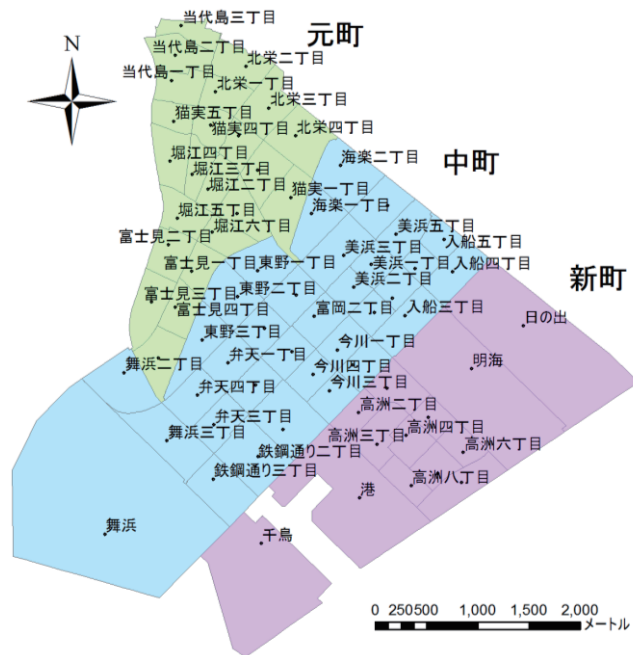


図1 浦安市の町丁目と埋立て年代による区分

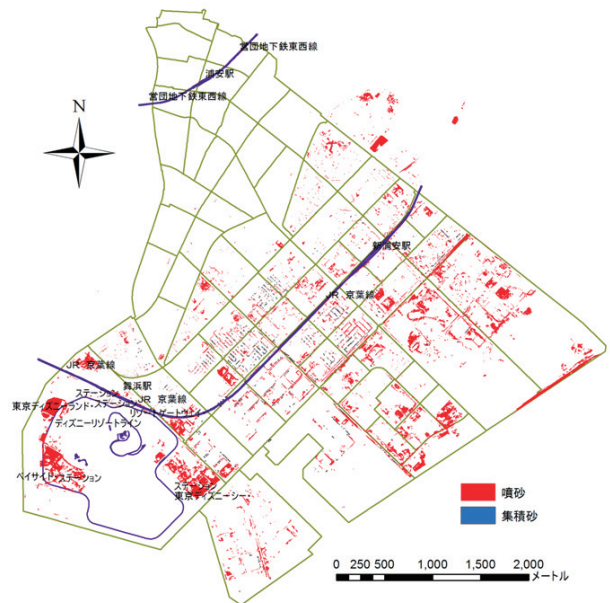


図2 航空写真の目視判読から作成した液状化マップ



図3 液状化範囲を噴砂と集積砂に分けた例

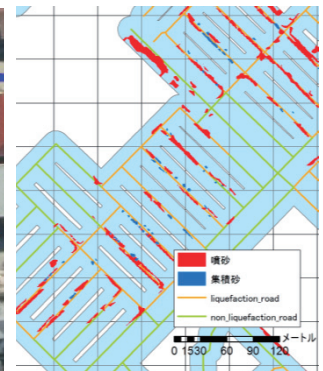


図4 精度検証手法の概略図





図6 液状化範囲の自動抽出に使用した航空写真

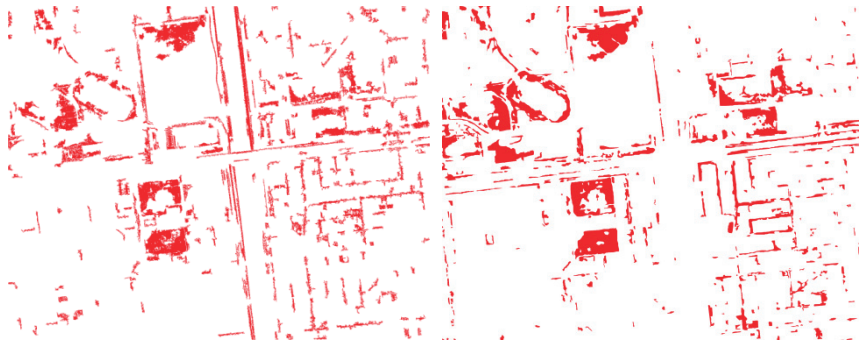


図7 教師付き分類結果から噴砂を抽出し、120ピクセル以下の小領域を除去したもの

図8 噴砂の目視判読結果

で液状化発生の有無が明瞭に分かれていることが確認できる。また、中町、新町では、液状化が多数発生している地区とほとんど発生のない地区が混在しており、町丁目によるバラつきが多いことがわかる。

本研究では、液状化による地表に現れた現象を噴砂と集積砂に分けて考え、それぞれを赤と青に色を塗り分けて判読を行った(図3)。噴砂とは噴出した砂の湿った部分と乾いた部分を合わせたものとし、集積砂とは戸建て住宅地域で多く見られた噴砂を道路の脇に集めて積み上げたものとした。この2つを足し合わせたものが地表に現れた液状化面積であるが、集積砂面積には積み上げられた性質を考慮して4倍の倍率を与えた(液状化面積=噴砂面積+集積砂面積×4)。この倍率は、噴砂と集積砂それぞれの層厚とその面積比を基にして、適当だと思われる値を仮定した(液状化による噴砂層厚は多いところでも約30cm程度、集積砂高さは1m以上)。噴砂と集積砂の残存状態を見ると、噴砂は埋立地全域で概ね確認することができるが、集積砂は戸建て住宅地域を中心に、工場地域など比較的小規模でしか確認することができない。この理由として、戸建て住宅地域内の街路では自主的に近隣住民が片づけを行ったが、主要な道路では交通の確保のため、道路管理者が噴砂を片づけて搬出したという理由が挙げられる。

次に、目視判読結果を国土交通省関東地方整備局が行った現地調査結果<sup>10)</sup>と比較し精度の検証を行った。この調査では、道路を1本ずつ踏査し、液状化と非液状化に区別して線的に表現している。工場など立ち入りができない箇所については、航空写真(本研究で使用したものと同じ千葉県が撮影したもの)により補完している。

目視判読結果は面的、現地調査結果は線的に表現されたデータであるため精度検証は以下に示す手法で行った。図4は精度検証手法の概略を示している。赤色、青色のポリゴンがそれぞれ噴砂、集積砂を、橙、緑色の線がそれぞれ液状化道路、非液状化道路を表している。まず、液状化道路の中心線と非液状化道路の中心線の両側に各15m幅の領域を作成し、その領域に含まれる噴砂・集積砂のポリゴンを抽出した。次に、全対象範囲を50mメッシュで覆い、メッシュ単位での両者の一致から正答率(正答数と空振り数の和に対する正答数の割合)と検出率(正答数と見逃し数の和に対する正答数の割合)を算出した。液状化・非液状化メッシュの判断は、目視判読結果、現地調査結果がそれぞれメッシュ内に噴砂・集積砂ポリゴン、液状化道路領域のいずれかを含んでいれば液状化メッシュと認定した。その結果を表5に示す。正答率、検出率がそれぞれ94.3%、84.2%という高い精度で目視判読を行えたが、空振り数に比べて見逃し数が3倍以上

表5 目視判読の精度検証結果

正答数	空振り数	見逃し数	正答率	検出率
3122	190	584	94.3%	84.2%

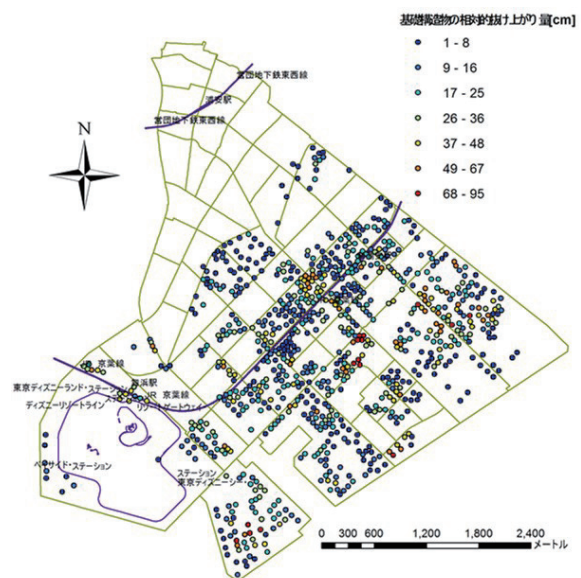


図9 地盤相対沈下量

の値であり、検出率が低い値であることがわかる。これは、建物の倒れこみや日影により噴砂の検出ができなかったこと、目視判読に用いた航空写真の撮影日が遅いため、噴砂が既に片付けられていたことによるものと考えられる。

これまで、航空写真からの目視による液状化の判読を行ったと述べてきたが、この方法は非常に時間を要するため、緊急時には有効な方法とはいえない。これを踏まえて、基礎的な検討として図6に示す限定した範囲で教師付き分類を行い、液状化の自動抽出についての検討を行った。教師として選んだ土地被覆の分類数は教師なし分類結果を参考にして、湿った噴砂、乾いた噴砂、植生、道路、裸地、水、建物1、建物2の計8分類とし、最尤法を用いての分類を行った。ここで建物の2分類は屋根の色を白色系と茶色系に分けることで行った。

教師付き分類結果のままではわかりにくいいため、乾いた噴砂と湿った噴砂のみを抽出し、ある大きさ以下のピクセル群を除くことでノイズや誤抽出の除去を行った。

なお、ここで1ピクセルは一辺約25cmの正方形である。いくつかの数値で試行したところ、最も精度よく液状化領域を抽出できた120ピクセル(約15m<sup>2</sup>)以下での結果を図7に示す。図8に示すのは前述した方法で行った目視判読結果である。両者を比較すると、空地や学校のグラウンドなどの開けた場所では比較的良い精度で抽出ができており、目視判読結果とかなり近い結果を得ることができたことがわかる。しかし、住宅が密集した戸建て住宅地域では影などの影響により抽出が難しいため、誤抽出が目立つ結果となった。そのため、液状化領域の航空写真からの自動抽出に関しては、今後さらなる検討が必要と考えられる。

### (2) 平均地盤相対沈下量

平均地盤相対沈下量とは、町丁目ごとの地盤相対沈下量の合計値をその範囲の沈下量測定点数で除したものである。前述したように、浦安市では航空レーザ測量による地震前後の地盤標高の計測が行われており、本来はこの結果を用いるべきである。しかし、データ入手が困難であったため、本研究では千葉県環境研究センターが実施した現地調査によるデータ<sup>11)</sup>を使用した。このデータは、浦安市内の埋立地を中心に約830点で沈下量の計測が行われたもので、基礎を有すると推定される構造物に残る、地震前の地表面の痕跡と地震後における地表面との差を測定したものである。本研究で使用するにあたり、公開されているデータをGISを用いて1点1点地図上にプロットして表示させた。その結果を図9に示す。色が赤に近いほど大きな沈下量を示しており、局所的に大きな沈下量を示す地域を確認することができる。しかし、その周辺では小さな値を示していることから、液状化と同様に地域によるバラつきが非常に大きいことがわかる。

次に、平均地盤相対沈下量の算出結果について述べる。最も平均沈下量が大きかったのは高洲1丁目の59cmで、次に高洲9丁目の40cmと続く。これ以降は30cm以下が続く、この2つの町丁目が他と比べて飛びぬけて大きい値であることが分かった。最小の値だったのは高洲3丁目の3cmであるが、測定点数が1か所であり信頼性が高いとはいえない。また、埋立地であっても測定点のない町丁目があることにも注意する。

### (3) 下水道管路被害率

過去の新潟県中越地震や鳥取県西部地震においては、液状化により発生した下水道管路やマンホールの浮上りの被害が多数報告されており<sup>12), 13)</sup>、今後の地震においても発生する可能性が非常に高い被害である。また、この下水道被害を引き起こす液状化は埋戻し材料によるところが大きいと指摘されている<sup>14)</sup>。ただし、浦安市の場合には埋戻し土だけでなく周辺地盤も液状化しており、それによる影響もあると考えられる。ここでは、浦安市における液状化に起因した下水道管路被害について述べる。

下水道管路被害率とは、町丁目ごとの下水道の被害管路延長を全管路延長で除したものである。下水道の管路および被害区間データは、浦安市下水道課から提供されたものを使用した。提供されたデータはCAD形式だったため、シェープファイル形式へと変換してGIS上で表示した(図10)。この下水道データは、被害が区間で表されており、これは主として液状化により管路が被災し泥が詰まった区間であり、赤色、青色のラインがそれぞれ被害管路、無被害の管路を示している。

これを見ると、下水道被害は中町を中心に、埋立地で多く発生していることが確認できる。下水道の管路延長

は中町、新町それぞれで94.4km、33.6km、被害管路延長はそれぞれ19.2km、4.6kmであり、中町の管路延長が新町に比べて非常に大きいことがわかる。これは、中町では戸建て住宅や団地が多く存在するのに対して、新町では高層ビルや未開発の空地が多いため、下水道の密度に大きく差があるためである。管路被害率は中町、新町でそれぞれ20.3%、13.7%であり中町の方が高い値であった。なお、元町での被害がゼロであったことから、下水道管路の被害は地震動ではなく、液状化によって引き起こされたものであると推察される。また、下水道の存在しない地域を確認することができるが、これは、港地区は下水道が未整備の浄化槽地区、ディズニールゾートは浄化槽と公共下水道を併用しているためである。

次に、下水道管路被害率の算出結果について述べる。最も高い被害率であったのは弁天3丁目の80%であり、次に、今川2, 3丁目、弁天1丁目、入船3, 4丁目などが約50%と続く。このように、弁天3丁目が他の町丁目と比べて飛びぬけて高く、全管路延長330mのうち265mが液状化により被災した。元町に近接した浦安市の町丁目の中で最も古い埋立地である海楽、東野では被害はなかった。

### (4) 戸建て住宅傾斜被害率

戸建て住宅の被害に関しても過去にいくつかの報告がなされており<sup>15)</sup>、住宅を建てる際は地盤改良を実施して地盤を堅固なものにするか、修復しやすいような基礎形

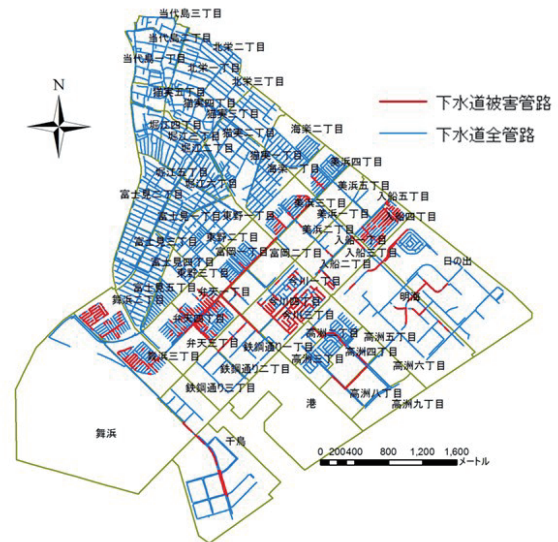


図10 下水道管路の被害状況

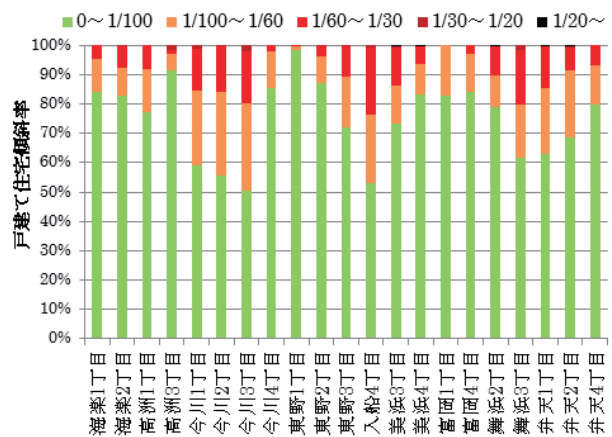


図11 町丁目毎の戸建て住宅の傾斜状況



式を選択することが推奨されている<sup>16)</sup>。ここでは、浦安市における液状化に起因した戸建て住宅の傾斜被害について述べる。

戸建て住宅傾斜被害率とは、町丁目ごとの半壊以上の建物数を全建物数で除したものである。町丁目毎の戸建て住宅の傾斜状況を図11に示す。このデータは浦安市液状化対策技術検討調査委員会がホームページ上で公開しているもの<sup>4)</sup>を使用した。半壊以上の建物とは、揺れや液状化により傾斜が1/100以上に達した建物のことであり、浦安市における被害棟数は半壊（傾斜1/100~1/60）が2,121棟、大規模半壊（傾斜1/60~1/20）が1,541棟、全壊（傾斜1/20~）が18棟となっている（2011年7月15日現在）。傾斜1/100未満は一部損壊以下であり、被害なしか一部損壊の判定は傾斜によらない。そのため、本研究では戸建て住宅傾斜被害率を全建物数に占める半壊以上の建物数と定義した。図11を見ると、今川、入船、弁天で戸建て住宅の被害が多かったことが確認できる。全壊となった建物は非常に少なく、被害が多かった町丁目でも全体の約0.3%だった。なお、このデータは建物全体ではなく戸建て住宅のみを対象としたもののため、戸建て住宅の存在しない町丁目についてはデータがない。

### 3. 液状化被害の分析

#### (1) 液状化面積率の検討

町丁目毎の液状化面積率を用いて、浦安市での液状化の発生について考察を行う。町丁目ごとの液状化面積率を図12に示す。これを見ると、高洲6丁目と唯一20%以上の高い液状化面積率であることがわかる。これは、この地域に空地が多く含まれていることが影響したと考えられる。このように、空地や駐車場での液状化は戸建て住宅などの密集住宅地域と比べると視認しやすいため、面積で見ると相対的に大きく評価されがちである。また、一般的に土地被覆の違いにより液状化による噴砂発生のしやすさに違いを見ることができ、アスファルトで覆われている道路と比べると、空地は噴砂が地表に噴出しやすいことも影響して、液状化面積が大きく評価される傾向にある。

しかし、日の出、明海は液状化面積率が低く、図2を見ると東京湾側は空地であるにも関わらず液状化の発生がほとんど確認できなかった。また、高洲5丁目、6丁

目のように近接した町丁目でも液状化面積率に大きな差がある。このように埋立て年代や土地被覆が近似し、位置的にも近接した地域で液状化の発生に顕著な差異が見られたことから、液状化発生の有無は埋立て年代の違いだけではなく、埋立て時の排砂ポンプの位置、地盤改良の有無、地下水位の違いなどが大きく影響したものと考えられる。

次に、入船4丁目、今川2、3丁目、弁天2丁目など中町の戸建て住宅地域で液状化面積率が高いことが確認できる。一方、下水道管路被害がなかった海楽、東野では、液状化面積率は比較的小きな値であった。なお、戸建て住宅地域では、空地などの開けた場所とは対照的に、液状化面積が過小評価される傾向にあるといえる。工場地域では、鉄鋼通りでは広い範囲で確認することができたが、港、千鳥ではほとんど確認できなかった。

このように町丁目毎に液状化発生に大きな差を確認することができ、これは埋立て年代の違いだけではなく、埋立て工事の施工過程、地盤改良の有無や方法、土地利用や土地被覆などの複合的な要因によって影響を受けたといえよう。

#### (2) 液状化面積率と被害データの相関分析

ここでは、液状化面積率と下水道管路被害率および戸建て住宅傾斜被害率の関係について検討する。

まず、液状化面積率と下水道管路被害率の関係について、図13に両者の関係を図示する。これを見ると、液状化面積率が8%以下では、下水道管路被害率の値は0-20%の間でほぼ横ばいであることがわかる。そして液状化面積率が8%を越えると、被害率が急激に上昇する傾向が読み取れる。このことから、液状化面積率8%を閾値として下水道管路被害が増大するとも考えられるが、一回帰をすることができず、両者の相関を確認することはできなかった。また、液状化面積率が他の町丁目と比べて飛びぬけて高かった高洲6丁目では、下水道管路の被害率はゼロであった。この要因として、下水道管路が高洲6丁目を囲むような形で敷設されており内部には存在しなかったこと、管路延長の合計が370mと比較的短かったことなどが挙げられる。

次に、液状化面積率と戸建て住宅傾斜被害率の関係を図14に示す。これを見ると、液状化面積率が高いほど傾斜被害率も高い値を示しており、正比例の関係であることがわかる。一次曲線に回帰すると決定係数0.59（相関

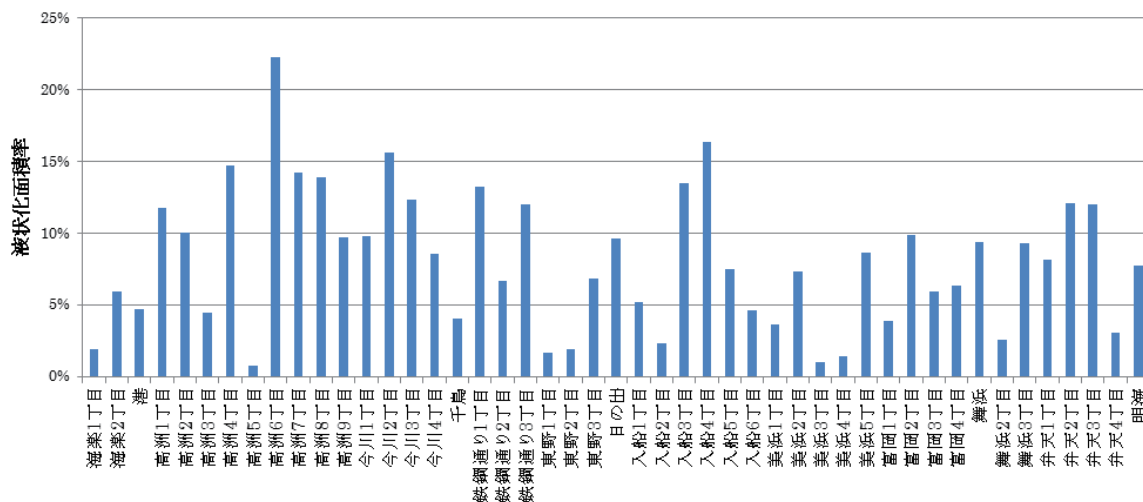


図12 町丁目毎の液状化面積率

係数 0.77) を示した。これはかなり高い値であり、両者はやや強い相関を有しているといえる。2つのデータを比較し、被害との相関を見るために、原点を通る一次回帰も行ったところ、決定係数 0.40 (相関係数 0.63) と先のものとは比べれば小さいが、両者の間にある程度の相関を認めることができた。ただし、傾斜被害率データが戸建て住宅のものしかないため、サンプルが少なく精度に問題がある。しかし、液状化により傾斜などの被害が発生するのは、基礎杭のない戸建て住宅が中心と考えられ、この方法の限界ともいえよう。

### (3) 平均地盤相対沈下量と被害データの相関分析

ここでは、平均地盤相対沈下量と下水道管路被害率および戸建て住宅傾斜被害率の関係について検討する。

まず、平均地盤相対沈下量と下水道管路被害率の関係について図 15 に示す。沈下量 12cm 以下では管路被害率は 0-10%の間であり、バラつきが少ない。しかし、それ以上では急激に被害率が上昇し、バラつきが非常に大きくなり、一次回帰をすることはできなかった。これは、地盤沈下が地区で面的に起こっているのに対し、下水道管路は道路（または歩道）下に埋まっており、道路周辺の液状化の状況や管路の施工・埋め戻し条件に強く依存するため、このような結果になったと考えられる。

平均地盤相対沈下量と下水道管路被害率が関係するメカニズムに関しては、前者は地盤沈下量そのものを表してはいるが、これが大きいと不等沈下量も大きくなると推察され、不等沈下によって間接的に下水道管被害が生じると考えることができよう。なお、前節で述べた液状化面積率と下水道管路被害率の関係と同様に、沈下量 12cm 付近が境界となって被害が増大しているように読み取れる。また、沈下量が 60cm、40 cm と大きな値であるにも関わらず、管路被害がゼロの町丁目を確認することができる。この高洲 1 丁目と 9 丁目の測定点数はそれぞれ 14 と 8 か所であり、他と比べてもそれほど少ないともいえず、下水道管路延長も短くはないため、この原因については不明である。

次に平均地盤相対沈下量と戸建て住宅傾斜被害率の関係を図 16 に示す。これを見ると、他の町丁目群と大きく離れている点があることが確認できる。これは高洲 1 丁目であり、前述したようにこれが何によるかは明らかにできなかったが、これを分析に影響を与える特異点と考えて対象から除いて検討を行った。図 16 に示す一次回帰は高洲 1 丁目を除いて回帰したものである。原点を通る一次回帰は決定係数 0.42 (相関係数 0.65) であり、両者の間にはある程度の相関があることを確認できた。

### (4) 液状化データ間および被害データ間の関係

地中の上下水道、ガス管、全壊建物の間には高い相関性があるという報告が既になされており<sup>17)</sup>、本研究で扱っている浦安市の液状化データ間および被害データ間についても同様に相関があることが考えられる。ここでは液状化面積率と平均地盤相対沈下量の関係、下水道管路被害率と戸建て住宅傾斜被害率の関係について検討を行う。

まず、液状化面積率と平均地盤相対沈下量の間を図 17 に示す。両者の関係は右肩上がりであるように見えるが、一次回帰を行ったところ相関はないとの結果を得た。そこで特異点ともいえる高洲 1 丁目と 9 丁目のデータを除いて回帰を行って見たところ、決定係数 0.03 (相関係数 0.18) とさらに低い値を得た。また、液状化面積率が最も高かった高洲 6 丁目の沈下量は下水道管路被害率と

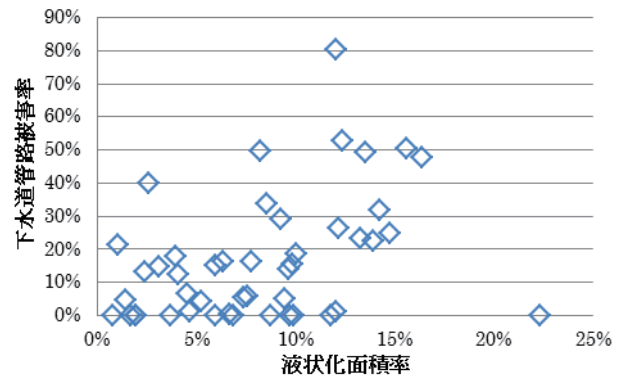


図 13 液状化面積率と下水道管路被害率の関係

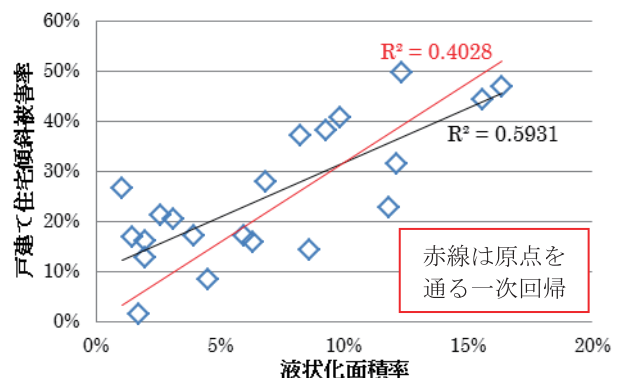


図 14 液状化面積率と戸建て住宅傾斜被害率の関係

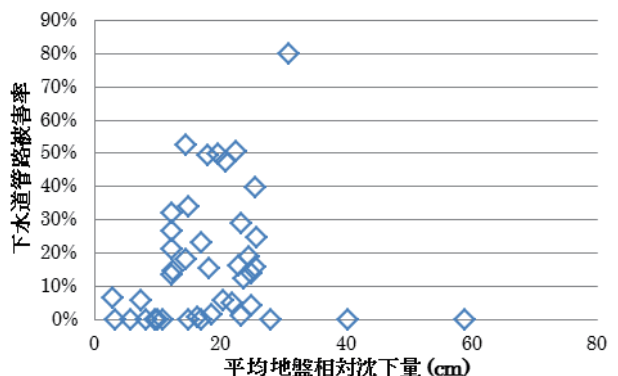


図 15 平均地盤相対沈下量と下水道管路被害率の関係

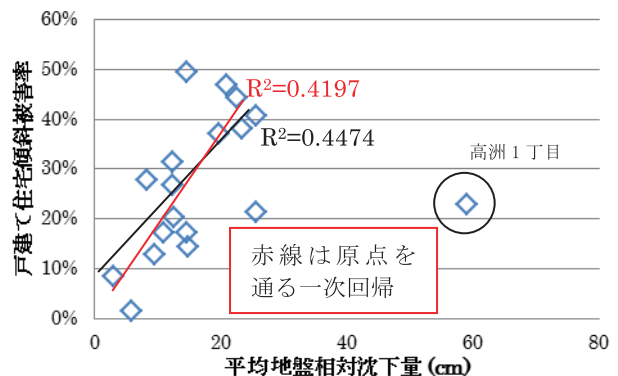


図 16 平均地盤相対沈下量と戸建て住宅傾斜被害率の関係



同様に低い値を示しており、他の町丁目群と大きく離れていることが確認できる。これは、高洲 6 丁目の沈下量測定点数が 5 か所と少ないために、測定値に偏りが出たと考えられる。そのため、これも特異点と考え、高洲 1 丁目、9 丁目とあわせて高洲 6 丁目のデータも除いて回帰してみたところ決定係数 0.15（相関係数 0.39）と低い相関を示した。

次に下水道管路被害率と戸建て住宅傾斜被害率の関係を図 18 に示す。これを見ると両者は正の相関の関係が見られ、決定係数 0.53（相関係数 0.73）であった。しかし、直線の切片が傾斜被害率 15% 付近であることがわかる。これは、前述したように、傾斜被害率が原点付近から上昇し始めるのに対して、下水道管路被害率は原点から離れたところから上昇し始めることが影響したと考えられる。つまり、戸建て住宅傾斜被害の方が下水道管路被害よりも低い液状化レベルから発生する被害だということを示した結果といえる。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、まず浦安市を東北地方太平洋沖地震の 6 日後に撮影した航空写真を用いて、液状化による噴砂やその集積箇所を目視判読を行い、同市における液状化の発生について検討した。また、千葉県、浦安市、国土交通省などが行った現地調査結果と比較することで、液状化地区の判読精度の検証を行った。その結果、液状化は中町、新町の埋立地で発生しており、その分布には非常に大きなバラつきがあることが確認された。さらに、埋立て年代や土地被覆が近似し、位置的にも近接した地区においても液状化の発生に大きな差が見られたことから、液状化発生の有無は埋立て年代だけではなく、埋立て工事の施工過程や、地盤改良の有無、地下水位の違いが大きく影響したと考察した。

目視判読結果と現地調査結果とを比較した結果、比較的良い精度であることが示された。このことから、航空写真によって大規模な液状化発生範囲の概略把握が可能であるといえよう。また、液状化範囲を画像解析により自動抽出をするための基礎的な検討として、教師付き分類を用いた液状化範囲の抽出を行った。その結果、目視判読とよく近似した結果を得ることができた。

次に、地表に現れた液状化現象（液状化データ）から液状化による埋設管や戸建て住宅の被害（被害データ）の推定を行うことを目的として、浦安市埋立地においてこれらの関係について検討を行った。その結果、液状化データと戸建て住宅傾斜被害率の間に良い相関関係が見られた。このことから、戸建て住宅の傾斜被害は、液状化面積率や平均地盤相対沈下量の地表に現れた液状化現象の程度から推定することができると考えられる。

これに対して、液状化データと下水道管路被害率の間では、一次回帰は困難であった。しかし、液状化レベルを液状化面積率または平均地盤相対沈下量によって代表させると、ある値以上から下水道管路の被害が引き起こされることを確認した。このようにバラつきが大きく一次回帰できなかった要因として、液状化データが地域の面的なものであるのに対し、下水道管路被害率は、管路が埋設された道路下における線的なもので、管路の埋設条件や周辺地盤の液状化状況が強く影響したと考察した。

また、下水道管路被害率と戸建て住宅傾斜被害率の関

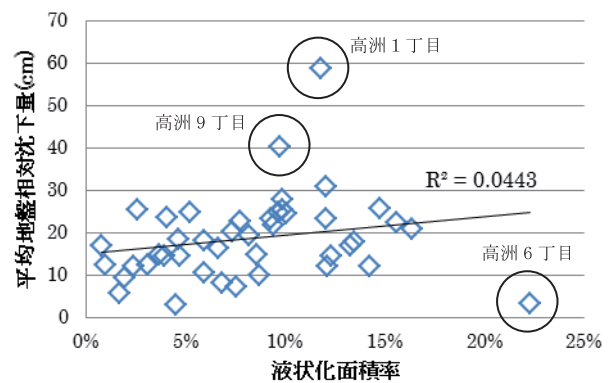


図 17 液状化面積率と平均地盤相対沈下量の関係

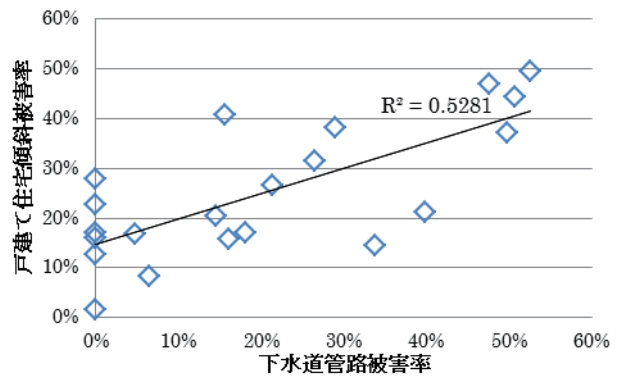


図 18 下水道管路被害率と戸建て住宅傾斜被害率の関係

係についても検討を行ったところ、これらの被害データ間で高い相関を有していることがわかった。この回帰直線の切片の値から考えて、住宅傾斜被害の方が下水道管路被害よりも低い液状化レベルから発生する傾向にあることが示された。ただし、下水道管路被害については、本復旧が未だ行われておらず、被害の詳細について明らかになっていないことを考えれば、この結果は暫定的なものであるといえよう。

今後の展望としては、水道管やガス管などの埋設管や、マンホールの被害データなども収集し、液状化現象の程度を表す指標を用いて分析を行うことで、液状化と地中構造物被害の関係をより明確にしたいと考えている。また、浦安市は戸建て住宅、団地、高層ビル、工場など多様な用途地域を有していることから、その地域差による違いを探り、地域によらずに適用できる手法を構築する必要がある。これとあわせて、浦安市以外の地域でも検討することで、より一般化した液状化に起因した構造物の被害推定を行えるようにしたいと考えている。

#### 謝辞

本研究で使用した空中写真と下水道台帳のデータはそれぞれ千葉県と浦安市下水道課より提供頂きました。また、浦安市液状化対策技術検討調査委員会、国土交通省関東地方整備局、千葉県環境研究センターがホームページ上で公開しているデータを使用させて頂きました。記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 総務省消防庁：緊急災害警備本部広報資料：平成 23 年 (2011 年)東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について（第 145 報），2012。  
<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>
- 2) 安田進，原田健二，石川敬祐：東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害，地盤工学ジャーナル，vol.7，No.1，pp.103-115，2012.
- 3) 京川裕之，清田隆，近藤康人，小長井一男：東北地方太平洋沖地震による浦安市埋立地盤の液状化被害調査，地盤工学ジャーナル，vol.7，No.1，pp.265-273，2012.
- 4) 浦安市：浦安市液状化対策技術検討調査委員会資料，  
<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu11324.html>
- 5) 東大生研地球環境工学研究グループ：東日本大震災初動対応プロジェクト，2011，  
[http://stlab.iis.u-tokyo.ac.jp/eq\\_data/](http://stlab.iis.u-tokyo.ac.jp/eq_data/)
- 6) 朝倉徹，須山翔太，江藤稚佳子，渋谷研一，小長井一男：航空レーザ計測を用いた液状化による標高変化の計測，生産研究，63 巻 6 号，pp.729-734，2011.
- 7) 長谷川浩一，酒井久和，若松加寿江，佐藤忠信：GIS を用いた新潟県中越地震における水道管の被害分析，GIS—理論と応用，Vol.13，No.2，pp.41-49，2005.
- 8) 浜田政則，安田進，磯山龍二，恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集，第 376 号／III-6，pp.221-229，1986.
- 9) 浦安市：環境ブック，  
<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu3183.html>
- 10) 国土交通省関東地方整備局：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態調査結果について，  
<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html>
- 11) 千葉県環境研究センター：第 3 報 千葉県内の液状化—流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果 —浦安地区(1)—，2011.
- 12) 若松加寿江，吉田望，規矩大義：2004 年新潟県中越地震による液状化現象と液状化発生地点の地形・地盤特性，土木学会論文集，Vol.62，No.2，pp.263-276，2006.
- 13) 藤村尚，2000 鳥取県西部地震による下水道施設の被害(2)，鳥取大学工学部研究報告，第 33 号，pp.41-47，2002.
- 14) 佐々木哲也，松尾修，田本修一：下水道管渠の地震時浮上がり及び埋戻し材料の影響，地震工学研究発表会講演論文集，第 26 回，pp.665-668，2001.
- 15) 有木寛江，徐挺，富永晃司，田村昌仁：2000 年鳥取県西部地震時の液状化による戸建住宅の被害調査，日本建築学会技術報告集，第 15 号，pp.375-378，2002.
- 16) 藤井衛，伊集院博，田村昌仁，伊奈潔：兵庫県南部地震の液状化地帯における戸建住宅の基礎の被害と修復—戸建住宅の基礎の修復に対する考え方—，土と基礎，46 巻 7 号，pp.9-12，1998.
- 17) 君島康太，丸山喜久，山崎文雄：新潟県中越沖地震におけるライフライン被害の空間相関性，土木学会地震工学論文集，第 30 巻，pp.614-621，2009.

(原稿受付 2012.5.26)

(登載決定 2012.9.8)